

Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ ile Çevresel Dönüşüm: Yenilikçi Çözümler ve Sürdürülebilir Uygulamalar

Elif Aktürk Bozdemir¹

Yakup Budak²

Özet

Bu çalışma, Yeşil Dönüşüm: Çevre Bilimlerinde İnovasyon ve Sürdürülebilir Çözümler kapsamında, çevre bilimleri ve teknolojilerindeki yenilikçi yaklaşımları ve uygulamaları derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Günümüzde, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, kaynak tükenmesi ve kirlilik gibi çevresel sorunlar, insanlık için acil çözüm gerektiren küresel tehditler olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, çalışma, çevre bilimlerinin temel kavramlarını, tarihsel gelişimini ve mühendislik disipliniyle entegrasyonunu ele alarak, çevresel sürdürülebilirlik için bütüncül bir çerçeve sunmaktadır. Sürdürülebilir mühendislik ilkeleri, yeşil teknolojiler, atık yönetimi sistemleri, su arıtma teknolojileri, hava kirliliği kontrol mekanizmaları, enerji yönetimi çözümleri ve iklim değişikliğiyle mücadele stratejileri gibi yenilikçi uygulamalar, güncel vaka analizleri ve teknolojik gelişmeler ışığında detaylı bir şekilde tartışılmaktadır. Ayrıca, biyoçeşitliliğin korunması, çevresel adaletin sağlanması ve sosyo-ekonomik boyutların çevresel politikalara entegrasyonu gibi konulara da odaklanılmaktadır. Çalışma, yapay zekâ, büyük veri analitiği ve uzaktan algılama gibi yeni teknolojilerin çevresel sorunların çözümündeki potansiyelini değerlendirerek, gelecekteki araştırma yönelimleri için bir yol haritası önermektedir. Türkiye özelinde çevresel politikalar ve uygulamalar da ele alınarak, yerel bağlamda sürdürülebilirlik çabalarının küresel hedeflerle nasıl uyumlaştırılabileceği tartışılmıştır. Sonuç olarak, çevresel

1 Dr. Öğr. Gör. Elif Aktürk Bozdemir, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, Tokat, 60200, Türkiye, elif.akturkbozdemir@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-9228-8635>

2 Prof. Dr. Yakup Budak, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, ybudak74@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7108-5548>

sürdürülebilirliğin ancak bilim, mühendislik, politika ve toplumun ortak çabasıyla mümkün olabileceği vurgulanmakta; disiplinlerarası iş birliğinin ve yenilikçi çözümlerin bu süreçteki kritik rolü üzerinde durulmaktadır.

1. Giriş

Çevresel sorunlar, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, kirlilik ve kaynak tükenmesi gibi küresel tehditlerle insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük meydan okumalardan biridir. Bu sorunlara çözüm bulmak için yenilikçi teknolojiler, özellikle nano-biyokimya ve yapay zekâ (AI) entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için umut verici bir yol haritası sunmaktadır. Bu bölüm, nano-biyokimya ve yapay zekanın çevresel uygulamalarda (su arıtımı, karbon yakalama, atık yönetimi) nasıl birleştiğini, bu teknolojilerin Türkiye'deki potansiyelini ve küresel örneklerini ele almaktadır. Ayrıca, bu teknolojilerin sınırlamaları, etik boyutları ve ölçeklenebilirlik zorlukları tartışılmaktadır.

Son yıllarda, çevre bilimleri ve mühendisliği, insan faaliyetlerinin doğal sistemler üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkileri en aza indirmek için disiplinlerarası bir perspektif sunan kritik bir alan olarak öne çıkmaktadır. İklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, su ve hava kirliliği ile doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel ölçekteki çevresel sorunlar, insanlık için acil çözüm gerektiren meseleler haline gelmiştir [1,2]. Sanayi Devrimi'nden bu yana artan endüstriyel faaliyetler ve kentleşme, ekosistemler üzerinde benzeri görülmemiş bir baskı yaratmış; bu durum, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır [3].

Çevre bilimleri, doğal sistemlerin işleyişini ve bu sistemlerin insan faaliyetleriyle nasıl etkileşime girdiğini anlamaya odaklanırken, çevre mühendisliği bu bilimsel bilgiyi kullanarak somut çözümler tasarlamakta ve uygulamaktadır. Bu iki disiplinin entegrasyonu, yalnızca teknik sorunlara yanıt vermekle kalmayıp, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve politik boyutları da kapsayan bütüncül bir yaklaşımı mümkün kılmaktadır [4]. Örneğin, iklim değişikliği gibi çok katmanlı bir sorunun ele alınması, hem çevresel verilerin analizini (çevre bilimleri) hem de karbon yakalama teknolojileri gibi mühendislik çözümlerini (çevre mühendisliği) gerektirmektedir [5].

Bu bağlamda, bu kitap bölümü, çevre bilimleri ve mühendisliğinin temel prensiplerini, tarihsel gelişimini ve günümüzdeki yenilikçi uygulamalarını sistematik bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır. Su kaynakları yönetimi, atık yönetimi, hava kirliliği kontrolü, enerji yönetimi, iklim değişikliğiyle mücadele, biyoçeşitliliğin korunması gibi spesifik alanlar, güncel literatür ve vaka analizleri ışığında ele alınacaktır. Ayrıca, çevresel adalet, sosyo-ekonomik

etkiler ve çevre politikaları gibi boyutlar da tartışmaya dahil edilerek, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada disiplinler arası işbirliğinin önemi vurgulanacaktır [6,7]. Türkiye özelinde çevresel uygulamalar ve politikalar da değerlendirilerek, yerel bağlamda sürdürülebilirlik çabalarının küresel hedeflerle nasıl uyumlaştırılabileceği üzerine bir perspektif sunulacaktır.

2. Çevre Bilimlerinin Temelleri

Çevre bilimleri, canlı organizmalar ile fiziksel çevreleri arasındaki etkileşimleri inceleyen, doğası gereği disiplinler arası bir alandır. Ekoloji, biyoloji, kimya, jeoloji ve sosyoloji gibi farklı bilim dallarını birleştirerek, çevresel süreçlerin karmaşıklığını anlamaya ve insan faaliyetlerinin bu süreçler üzerindeki etkilerini değerlendirmeye odaklanır [8]. Bu disiplinin temel amacı, ekosistemlerin sağlıklı işleyişini korumak, çevresel bozulmayı önlemek ve sürdürülebilir bir denge sağlamaktır.

2.1. Çevre Bilimlerinin Tanımı ve Kapsamı

Çevre bilimleri, doğal sistemlerin yapısını, işleyişini ve bu sistemler üzerindeki insan etkilerini anlamayı hedefler. Ekosistem hizmetleri (örneğin, temiz hava, su, gıda üretimi), biyojeokimyasal döngüler (karbon, azot, su döngüsü) ve biyoçeşitlilik gibi kavramlar, bu disiplinin temel taşlarını oluşturur [9]. Çevre bilimleri, yalnızca kirlilik veya habitat kaybı gibi olumsuz etkileri değil, aynı zamanda ekosistemlerin insan refahına sunduğu pozitif katkıları da analiz eder. Örneğin, orman ekosistemlerinin karbon tutma kapasitesi, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynar [10].

Bu disiplin, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), modelleme teknikleri ve laboratuvar analizleri gibi çeşitli yöntemlerle çevresel verileri toplar ve değerlendirir. Bu veriler, çevresel politikaların bilimsel bir temele oturtulmasında ve mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde vazgeçilmez bir öneme sahiptir [11]. Çevre bilimlerinin kapsamı, yerel ölçekteki su kirliliği sorunlarından küresel ölçekteki iklim değişikliğine kadar geniş bir yelpazeyi kapsar ve bu nedenle disiplinler arası bir yaklaşımı zorunlu kılar.

2.2. Çevresel Sorunların Tarihsel Gelişimi

İnsanlık, tarih boyunca çevresel sorunlarla karşılaşmış, ancak bu sorunların boyutu ve etkisi, özellikle Sanayi Devrimi'nden itibaren dramatik bir şekilde artmıştır. 18. yüzyılda başlayan bu süreç, fosil yakıtların yoğun kullanımı, hızlı kentleşme ve endüstriyel üretimle birlikte, hava ve su kirliliği, ormansızlaşma ve habitat kaybı gibi sorunları kronik hale getirmiştir [12]. 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, çevresel bozulmanın küresel boyutları

daha belirgin hale gelmiş; bu durum, çevresel farkındalığın artmasına ve çevre hareketlerinin doğuşuna zemin hazırlamıştır.

Rachel Carson'ın 1962'de yayımlanan *Silent Spring* adlı eseri, pestisitlerin ekosistemler üzerindeki yıkıcı etkilerini ortaya koyarak modern çevre hareketini tetiklemiştir [13]. 1972'de düzenlenen Birleşmiş Milletler Stockholm İnsan Çevresi Konferansı, çevresel sorunları küresel politik gündeme taşımış ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) kurulmasına öncülük etmiştir [14]. 1992 Rio Zirvesi ve 2015 Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası girişimler, çevresel sorunlara karşı küresel iş birliğini güçlendirmiştir. Bu tarihsel süreç, çevresel sorunların yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyal ve politik bir mesele olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [15].

3. Sürdürülebilir Mühendislik Yaklaşımları

Çevre mühendisliği, bilimsel prensipleri kullanarak çevresel sorunlara pratik çözümler geliştiren bir disiplindir. Geleneksel olarak atık su arıtımı, katı atık yönetimi ve hava kirliliği kontrolü gibi alanlara odaklanan bu disiplin, günümüzde sürdürülebilirlik kavramı etrafında yeniden şekillenmektedir [16].

3.1. Sürdürülebilir Mühendislik İlkeleri

Sürdürülebilir mühendislik, çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri dengeleyerek, kaynakların verimli kullanımını ve çevresel bozulmanın en aza indirilmesini hedefler. Bu yaklaşım, projelerin tasarım, üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarının tamamında çevresel etkileri göz önünde bulundurur [17]. Örneğin, “beşikten beşiğe” (cradle-to-cradle) tasarım felsefesi, atıkların birer kaynak olarak yeniden kullanılmasını teşvik eder ve doğrusal “al-yap-at” modeline alternatif sunar [18].

Sürdürülebilir mühendislik ilkeleri, enerji verimliliği, yenilenebilir kaynak kullanımı ve atık azaltımı gibi temel unsurları içerir. Bu ilkeler, inşaat sektöründen enerji üretimine, ulaşımdan endüstriyel süreçlere kadar geniş bir yelpazede uygulanabilir. Örneğin, yeşil bina tasarımları, enerji tüketimini azaltmak için pasif soğutma ve doğal aydınlatma gibi yöntemleri benimser [19].

3.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), bir ürün veya hizmetin hammadde çıkarımından üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini sistematik olarak analiz

eden bir yöntemdir [20]. LCA, enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, su kullanımı ve atık üretimi gibi faktörleri değerlendirerek, çevresel performansın iyileştirilmesi için fırsatlar sunar. Örneğin, bir ürünün karbon ayak izini hesaplamak, üretim süreçlerinde daha az emisyon üreten alternatif malzemelerin seçilmesine olanak tanır [21].

LCA, özellikle endüstriyel tasarım ve politika geliştirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Avrupa Birliği'nin çevre politikaları, ürünlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için LCA'yı bir standart olarak benimsemiştir [22]. Bu yöntem, sürdürülebilir mühendislik uygulamalarının bilimsel bir temele oturtulmasında kritik bir araçtır.

3.3. Eko-Tasarım ve Temiz Üretim

Eko-tasarım, ürünlerin çevresel etkilerini en aza indirecek şekilde tasarlanmasını hedefleyen bir yaklaşımdır. Malzeme seçimi, enerji verimliliği, dayanıklılık, tamir edilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi faktörler, eko-tasarımın temel ilkeleridir [23]. Örneğin, elektronik cihazlarda modüler tasarım, cihazların kolayca tamir edilmesini ve bileşenlerin yeniden kullanılmasını sağlayarak atık miktarını azaltır [24].

Temiz üretim ise, üretim süreçlerinde kirliliği kaynağında önlemeyi ve kaynakların verimli kullanımını teşvik etmeyi amaçlar. Bu yaklaşım, endüstriyel süreçlerde atık ve emisyon azaltımı için yenilikçi teknolojilerin benimsenmesini destekler [25]. Temiz üretim hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunarak, işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkı sağlar.

4. Yenilikçi Teknolojiler ve Uygulamalar

Çevre mühendisliği, teknolojik yeniliklerin çevresel sorunlara çözüm üretmede önemli bir rol oynadığı bir alandır. Günümüzde, yapay zekâ, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT) ve biyoteknoloji gibi teknolojiler, çevresel izleme ve yönetim süreçlerini dönüştürmektedir [26].

4.1. Su Kaynakları Yönetimi ve Teknolojileri

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, küresel ve yerel ölçekte çevresel sürdürülebilirliğin temel taşlarından biridir. Nano-biyokimya, biyo-uyumlu nano-filtreler ve enzim tabanlı katalizörler aracılığıyla su arıtımında devrim yaratmaktadır. Örneğin, grafen oksit bazlı nano-membranlar, kirleticileri yüksek verimlilikle filtrelerken, AI algoritmaları bu membranların performansını optimize etmektedir. Türkiye'de, İstanbul'daki su arıtma tesislerinde pilot projeler, nano-biyokimyasal filtrelerin AI ile

entegrasyonunu test etmektedir. Ancak, bu teknolojilerin yüksek maliyeti ve altyapı eksiklikleri, yaygın uygulanabilirliğini sınırlamaktadır [27,28].

Akıllı su şebekeleri, IoT tabanlı sensörler ve veri analitiği kullanarak su sızıntılarını tespit eder ve suyun verimli dağıtımını sağlar. Bu sistemler, özellikle kentsel alanlarda su kaynaklarının etkin yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır [29]. Ayrıca, yağmur suyu hasadı ve gri suyun geri kazanımı gibi doğa tabanlı çözümler, suyun sürdürülebilir kullanımını desteklemektedir [30].

4.2. Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi

Döngüsel ekonomi, atıkların yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü teşvik ederek çevresel sürdürülebilirliği destekler. Nano-biyokimya, biyokimyasal atıkların ayrıştırılmasında yenilikçi çözümler sunar. AI tabanlı robotik sistemler, nano-biyosensörlerle entegre edilerek geri dönüştürülebilir malzemelerin ayrıştırma verimliliğini artırmaktadır. Türkiye’de, İstanbul’daki geri dönüşüm tesislerinde bu tür sistemlerin pilot uygulamaları, atık yönetiminde %30’luk bir verimlilik artışı sağlamıştır. Ancak, bu teknolojilerin ölçeklendirilmesi için finansman ve uzmanlık eksiklikleri giderilmelidir.

Atık yönetimi, çevresel kirliliğin önlenmesi ve kaynakların verimli kullanımı açısından kritik bir alandır. Geleneksel atık bertaraf yöntemleri (düzenli depolama, yakma) yerine, döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda atıkların birer kaynak olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir [31]. Anaerobik çürütme teknolojileri, organik atıklardan biyogaz ve biyogübre üreterek hem enerji geri kazanımı sağlar hem de atık miktarını azaltır [32].

Dijital teknolojiler, atık yönetiminde optimizasyon sağlamak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Örneğin, yapay zekâ destekli atık ayrıştırma sistemleri, geri dönüştürülebilir malzemelerin daha verimli bir şekilde sınıflandırılmasını mümkün kılmaktadır [33]. Bu tür yenilikler, atık yönetiminde hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği artırmaktadır.

4.3. İklim Değişikliğiyle Mücadele Stratejileri

İklim değişikliği, küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamayı hedefleyen Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası çerçevelerle mücadele edilmesi gereken bir acil durumdur. Nano-biyokimya, karbon yakalama için biyoyumlu metal-organik çerçeveler (MOFs) geliştirirken, AI bu malzemelerin kuantum kimyasal modellemesini optimize etmektedir. Örneğin, MIT’nin MOF tabanlı karbon yakalama projeleri, AI ile %40 daha verimli hale getirilmiştir. Türkiye’de, TÜBİTAK destekli projeler, bu teknolojilerin yerel enerji santrallerinde uygulanabilirliğini araştırmaktadır, ancak altyapı

eksiklikleri bir engel oluşturmaktadır. Hava kirliliği, özellikle Türkiye gibi sanayi bölgelerinde ciddi bir sağlık tehdididir. Nano-biyokimya, hava filtrelemede kullanılan nano-katalizörlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. AI, bu katalizörlerin performansını gerçek zamanlı olarak optimize ederek kirlilik kontrolünü iyileştirmektedir. Ege Bölgesi'nde, deniz kirliliğini izlemek için AI tabanlı nano-biyosensörlerin kullanımı, hava ve su kirliliği kontrolünde yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

Hava kirliliği, insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde ciddi tehditler oluşturan küresel bir sorundur. Endüstriyel emisyonlar, ulaşım ve enerji üretimi, hava kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır [34]. Yenilikçi hava kirliliği kontrol teknolojileri, bu kaynaklardan salınan kirleticileri azaltmayı hedeflemektedir. Örneğin, elektrostatik çöktürücüler ve katalitik konvertörler, endüstriyel tesislerden ve araçlardan salınan partikül maddeleri ve gazları etkili bir şekilde filtrelemektedir [35].

Hava kalitesi izleme sistemleri, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz için IoT ve yapay zekâ teknolojilerini kullanmaktadır. Bu sistemler, kirlilik seviyelerini izleyerek erken uyarı mekanizmaları oluşturmakta ve halk sağlığını korumak için hızlı müdahalelere olanak tanımaktadır [36]. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, hava kirliliğini azaltmada uzun vadeli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [37].

4.4. Enerji Verimliliği Çözümleri

Enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik için vazgeçilmezdir. Nano-biyokimya, biyo-uyumlu güneş pilleri ve yakıt hücreleri gibi yenilikçi enerji teknolojileri geliştirirken, AI bu sistemlerin enerji üretimini optimize eder. Türkiye'de, Ege Bölgesi'ndeki yenilenebilir enerji projeleri, nano-biyokimyasal malzemelerin AI ile entegrasyonunu test etmektedir. Ancak, bu teknolojilerin yaygınlaşması için politik destek ve finansman gereklidir.

Enerji yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kalkınma arasında bir denge kurmayı hedefleyen stratejik bir alandır. Fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak için yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal) giderek daha fazla önem kazanmaktadır [38]. Örneğin, güneş enerjisi sistemleri hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte enerji üretiminde maliyet etkin çözümler sunmaktadır [39].

Enerji verimliliği uygulamaları, enerji tüketimini azaltarak çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlar. Akıllı şebekeler, enerji talebini optimize ederek yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve enerji sistemlerinin esnekliğini artırmaktadır [40]. Ayrıca, enerji depolama

teknolojileri (örneğin, lityum-iyon bataryalar), yenilenebilir enerjinin sürekli ve güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [41].

5. İklim Değişikliği ve Biyoçeşitlilik

İklim değişikliği ve biyoçeşitlilik kaybı, günümüzün en acil çevresel sorunları arasında yer almaktadır. Bu iki mesele, ekosistemlerin sağlığını ve insan refahını doğrudan etkilemektedir [42].

5.1. İklim Değişikliği Modelleri ve Uyum Stratejileri

İklim değişikliği, küresel sıcaklık artışları, deniz seviyesi yükselmesi ve ekstrem hava olaylarının sıklığındaki artış gibi etkilerle ekosistemler ve insan toplumları üzerinde derin izler bırakmaktadır [43]. İklim modelleri, gelecekteki iklim koşullarını öngörmek ve bu koşullara uyum sağlamak için kritik bir araçtır. Bu modeller, sera gazı emisyon senaryolarını ve çevresel değişkenleri analiz ederek, politika yapıcılara bilimsel temelli bilgiler sunar [44].

Uyum stratejileri, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı dayanıklılığı artırmayı hedefler. Örneğin, kıyı bölgelerinde Mangrov restorasyonu ve sel bariyerleri gibi doğa tabanlı çözümler, deniz seviyesi yükselmesine karşı koruma sağlar [45]. Azaltım önlemleri ise, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri gibi yenilikçi yöntemlerle sera gazı emisyonlarını düşürmeyi amaçlar [46].

5.2. Biyoçeşitlilik Koruma Yöntemleri

Biyoçeşitlilik, ekosistemlerin sağlığını ve işlevselliğini sürdüren temel bir unsurdur. Ancak, habitat kaybı, kirlilik ve iklim değişikliği gibi faktörler, biyoçeşitliliği tehdit etmektedir [47]. Koruma stratejileri, türlerin ve habitatların korunmasını, ekosistem hizmetlerinin devamlılığını sağlamayı hedefler. Örneğin, koruma alanlarının oluşturulması ve ekosistem restorasyonu, biyoçeşitliliğin korunmasında etkili yöntemlerdir [48].

Doğa tabanlı çözümler (Nature-based Solutions - NbS), biyoçeşitlilik korumasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yaklaşım, ekosistemlerin doğal süreçlerinden yararlanarak çevresel sorunlara çözüm üretmeyi amaçlar. Örneğin, yapay sulak alanlar hem su arıtımını sağlar hem de biyolojik çeşitlilik için yeni habitatlar oluşturur [49].

6. Sosyal ve Ekonomik Boyutlar

Çevresel sorunlar, yalnızca teknik ve bilimsel bir mesele olmayıp, aynı zamanda sosyal ve ekonomik boyutları da içermektedir. Bu boyutlar, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada belirleyici bir rol oynamaktadır [50].

6.1. Çevresel Adalet ve Türkiye’deki Uygulamaları

Çevresel adalet, çevresel risklerin ve faydaların toplumlar arasında adil bir şekilde dağıtılmasını hedefleyen bir kavramdır [51]. Düşük gelirli topluluklar ve azınlık grupları, genellikle hava ve su kirliliği gibi çevresel risklere daha fazla maruz kalmaktadır [51]. Türkiye’de bu durum, özellikle sanayi bölgelerindeki düşük gelirli topluluklarda belirgindir. Örneğin, Dilovası’nda endüstriyel kirlilik, yerel halkın sağlığını tehdit ederken, çevresel adalet politikalarının eksikliği bu eşitsizlikleri derinleştirmektedir [52]. Çevresel adaletin sağlanması, bu eşitsizliklerin giderilmesini ve çevresel karar alma süreçlerine tüm paydaşların katılımını gerektirir [52]. Bu bağlamda, risk dağılımı endeksleri gibi ölçüm araçları, kirlilik kaynaklarının coğrafi dağılımını analiz ederek dezavantajlı topluluklara yönelik koruyucu politikaların oluşturulmasını destekleyebilir [52]. Örneğin, İzmir’de sivil toplum kuruluşlarının su yönetimi projelerine katılımı, yerel toplulukların karar alma süreçlerine dahil edilmesiyle daha kapsayıcı ve adil çözümler üretilmesini sağlamıştır [52].

Çevresel adaletin sağlanmasında toplumsal farkındalık ve çevre eğitimi kritik bir rol oynamaktadır. Çevre eğitimi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada toplumsal bilinci artırmanın temel araçlarından biridir [6]. Türkiye’de, ilkökul ve ortaokul müfredatlarında çevre eğitimi genellikle biyoloji dersleriyle sınırlı kalmakta, bu da kapsamlı bir çevresel farkındalık oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Ancak, Cittaslow hareketi gibi yenilikçi girişimler, yerel topluluklarda çevre bilincini artırmak için etkili bir model sunmaktadır. Örneğin, Seferihisar’daki Cittaslow projeleri, yerel halkı sürdürülebilir tarım ve turizm konusunda eğiterek çevresel farkındalığı güçlendirmiştir [69]. Ayrıca, okul dışı öğrenme ortamları, örneğin doğa kampları ve çevre festivalleri, genç nesillerde çevre bilincini artırmada önemli bir potansiyele sahiptir [6]. Toplumsal farkındalığı artırmak için sosyal medya kampanyaları ve halk katılımı gibi modern araçlar da etkili bir şekilde kullanılabilir [69]. Bu çabalar, çevresel adaletin toplumsal tabanını genişleterek, dezavantajlı toplulukların çevresel karar alma süreçlerine daha etkin katılımını desteklemektedir.

Bu birleşik bölüm, çevresel adaletin kavramsal çerçevesini, Türkiye’deki uygulamalarını ve toplumsal farkındalığın artırılmasında çevre eğitiminin

rolünü bütüncül bir şekilde sunarak, sürdürülebilirlik ve adalet hedeflerine ulaşmada disiplinlerarası yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

6.2. Yeşil Ekonomi ve Ekonomik Etkiler

Yeşil ekonomi, çevresel sürdürülebilirliği ekonomik kalkınma ile birleştiren bir modeldir. Bu yaklaşım, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve döngüsel ekonomi gibi alanlarda yeni iş fırsatları yaratmayı hedefler [53]. Örneğin, yenilenebilir enerji sektöründeki yatırımlar hem çevresel etkileri azaltmakta hem de istihdam olanakları sunmaktadır [54]. Yeşil ekonomi, çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik büyüme arasında bir denge kurarak, uzun vadeli refahı destekler.

7. Politika ve Yönetişim

Çevre politikaları ve yönetim, çevresel sorunların çözümünde hukuki ve idari çerçeveler sunar. Bu politikalar, doğal kaynakların korunmasını, kirliliğin önlenmesini ve iklim değişikliğiyle mücadeleyi hedefler [55].

7.1. Ulusal ve Uluslararası Çevre Politikaları

Ulusal çevre politikaları, ülkelerin çevresel sorunlara yönelik stratejilerini ve düzenlemelerini içerir. Türkiye’de, Çevre Kanunu ve ilgili yönetmelikler, çevresel kirliliğin önlenmesi ve doğal kaynakların korunması için temel bir çerçeve sunmaktadır [56]. Uluslararası düzeyde ise, Paris İklim Anlaşması ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDGs), küresel çevresel sorunlara karşı iş birliğini teşvik etmektedir [57].

7.2. Çevre Yönetişimi ve Paydaş Katılımı

Çevre yönetişimi, çevresel karar alma süreçlerinde devlet, özel sektör, sivil toplum ve yerel topluluklar gibi paydaşların rollerini tanımlar. Katılımcı yaklaşımlar, çevresel politikaların meşruiyetini artırır ve yerel bilgi birikiminin süreçlere entegrasyonunu sağlar [58]. Örneğin, yerel toplulukların su kaynakları yönetimine katılımı, daha etkili ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlar [59].

7.3. Türkiye’de Çevre Hareketleri ve Yerel Yönetimlerin Rolü

Türkiye’deki çevre hareketleri ve yerel yönetimlerin sürdürülebilirlik projeleri, çevresel politikaların küresel hedeflerle uyumlaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, Kaz Dağları’nda altın madenciliğine karşı düzenlenen çevre protestoları, sivil toplumun biyoçeşitlilik koruma çabalarını güçlendirmiştir. Ayrıca, İstanbul ve Ankara gibi büyük şehirlerde belediyeler

tarafından uygulanan sürdürülebilir ulaşım projeleri (örneğin, bisiklet yolları ve elektrikli otobüs filoları), karbon emisyonlarını azaltmada etkili olmuştur. Ancak, bu projelerin yaygınlaşması için finansman, altyapı ve politik destek eksiklikleri giderilmelidir. Türkiye'nin Paris İklim Anlaşması'na uyumu, yerel yönetimlerin yenilenebilir enerji ve atık yönetimi projelerine verdiği destekle güçlenebilir.

8. Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ ile Çevresel Çözümler: Türkiye ve Küresel Örnekler

Vaka analizleri, yenilikçi teknolojilerin çevresel sorunlara nasıl uygulandığını anlamak için güçlü bir araçtır. Bu bölüm, nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonunun Türkiye'deki ve küresel ölçekteki uygulamalarını vaka analizleri üzerinden ele almaktadır. Türkiye'deki yerel projeler, küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumu gösterirken, karşılaşılan zorluklar (altyapı, finansman, uzmanlık) tartışılmaktadır.

8.1 Küresel Vaka Çalışmaları

Küresel ölçekte, nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Örneğin, Singapur'daki su arıtma tesislerinde, AI destekli nano-biyosensörler, kirleticilerin gerçek zamanlı izlenmesini sağlamak ve arıtma süreçlerini %35 daha verimli hale getirmektedir. Benzer şekilde, ABD'de karbon yakalama için geliştirilen biyo-uyumlu MOF'lar, AI ile optimize edilerek enerji tüketimini azaltmıştır.

8.2 Türkiye'de Genel Çevresel Uygulamalar

Türkiye'de, çevresel sürdürülebilirlik projeleri, yerel yönetimler ve TÜBİTAK gibi kurumlar tarafından desteklenmektedir. İstanbul'daki geri dönüşüm tesisleri ve Konya Kapalı Havzası'ndaki su yönetimi projeleri, yenilikçi teknolojilerin yerel bağlamda uygulanabilirliğini göstermektedir. Ancak, bu projelerin ölçeklendirilmesi için finansman ve politik destek eksiklikleri bir engel oluşturmaktadır.

8.3 Yerel Yönetimlerin Rolü

Yerel yönetimler, Türkiye'de çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir rol oynamaktadır. İstanbul ve Ankara'daki sürdürülebilir ulaşım projeleri (örneğin, elektrikli otobüs filoları), karbon emisyonlarını azaltmada etkili olmuştur. Ancak, bu projelerin yaygınlaşması için daha fazla kaynak ve toplumsal farkındalık gereklidir.

8.4 Türkiye’de Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ Uygulamaları

Türkiye’de nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, çevresel sorunlara yenilikçi çözümler sunmaktadır. Ege Bölgesi’nde, deniz kirliliğini izlemek için AI tabanlı nano-biyosensörlerin kullanımı, kirlilik kontrolünde yeni bir yaklaşım sunmaktadır. İstanbul’da, biyokimyasal atık ayrıştırmasında robotik sistemlerin AI ile optimizasyonu, geri dönüşüm verimliliğini artırmıştır. TÜBİTAK destekli projeler, nano-biyokimya tabanlı su arıtma teknolojilerini geliştirmekte, ancak altyapı eksiklikleri ve uzmanlık eksikliği bu teknolojilerin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Bu vaka analizleri, Türkiye’nin küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlaştırma çabalarını göstermektedir.

8.5. Vaka Çalışmaları, Başarılı Uygulamalar ve Teknolojik Yenilikler

Çevre bilimleri ve mühendislik alanında vaka çalışmaları, teorik bilginin pratik uygulamalara dönüşümünü göstererek çevresel sorunlara yenilikçi çözümler sunar. Örneğin, Hollanda’nın su yönetimi projeleri, deniz seviyesi yükselmesine karşı geliştirilen su setleri ve suyun yeniden kullanımı için tasarlanmış sistemlerle iklim değişikliğinin zorluklarıyla başa çıkmada öncüdür [60]. Bu projeler, çevresel sorunları çözmenin ötesinde, toplumların yaşam standartlarını yükseltir ve ekonomik faydalar sağlar [60]. Benzer şekilde, İskandinav ülkelerindeki entegre atık yönetimi sistemleri, atık ayrıştırma ve geri dönüşüm uygulamalarını optimize ederek enerji tasarrufu sağlar ve karbon ayak izini azaltır [61]. Almanya’nın yenilenebilir enerjiye geçişte kullandığı Feed-in Tariff (FiT) sistemi ise temiz enerji üretiminde büyük bir artış sağlayarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada etkili bir model sunar [62].

Yapay zekâ (AI) ve uzaktan algılama teknolojileri, çevresel sorunlara yönelik yenilikçi uygulamalarda önemli bir rol oynar. Örneğin, AI tabanlı iklim modellemesi, bölgesel iklim değişikliği etkilerini öngörmek için kullanılmaktadır. Türkiye’de, Ege Bölgesi’nde rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için AI destekli modellemeler başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca, atık yönetiminde robotik ayrıştırma sistemleri, geri dönüştürülebilir malzemelerin verimliliğini artırmakta, ancak yüksek maliyet ve bakım gereksinimleri gibi sınırlamalarla karşılaşmaktadır. Uzaktan algılama teknolojileri, örneğin Sentinel-2 uydularıyla orman kaybını izleyerek biyoçeşitlilik koruma projelerine destek sağlar. Ancak, veri erişimi ve uzmanlık eksikliği gibi engeller, bu teknolojilerin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Bu bağlamda, teknolojilerin çevresel sorunlara entegrasyonunda maliyet-etkinlik analizi ve etik değerlendirmeler kritik öneme sahiptir.

Nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, çevresel sorunlara yönelik yenilikçi malzemelerin tasarımında devrim yaratmaktadır. Biyo-uyumlu nano-malzemeler, örneğin enzim tabanlı nano-katalizörler, su arıtımı ve karbon yakalama süreçlerini iyileştirirken, AI algoritmaları bu malzemelerin kimyasal özelliklerini optimize eder. Örneğin, biyo-nano filtrelerin AI ile tasarımı, kirletici gideriminde %50'ye varan verimlilik artışı sağlamıştır. Türkiye'de, İstanbul'daki su arıtma tesislerinde bu teknolojilerin pilot uygulamaları umut verici sonuçlar sunarken, yüksek maliyetler ve uzmanlık eksikliği ölçeklenebilirliği sınırlamaktadır. Ayrıca, nano-malzemelerin çevresel toksisitesi gibi etik boyutlar dikkatle değerlendirilmelidir.

Bu bölüm, çevresel sorunlara yönelik başarılı uygulamaları, teknolojik yenilikleri ve bunların Türkiye'deki örneklerini bütünlüklü bir şekilde ele alarak hem küresel hem de yerel bağlamda çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi yaklaşımları ortaya koymaktadır.

9. Gelecek Perspektifleri

Çevre bilimleri ve mühendisliği, gelecekte yeni teknolojilerin ve disiplinler arası yaklaşımların etkisiyle daha da dönüşecektir. Yapay zekâ (AI), büyük veri analitiği ve uzaktan algılama gibi teknolojiler, çevresel izleme ve yönetim süreçlerini yeniden şekillendirmektedir [63].

9.1. Yeni Teknolojilerin Rolü

Yapay zekâ ve makine öğrenimi, çevresel verilerin analizinde ve öngörü modellerinin geliştirilmesinde devrim yaratmaktadır. Örneğin, AI tabanlı modeller, hava kirliliği seviyelerini önceden tahmin ederek erken müdahale imkânı sunar [64]. Büyük veri analitiği ise, çevresel değişkenlerin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayarak, karar alma süreçlerini hızlandırır [65].

9.2. Gelecekteki Araştırma Yönelimleri

Gelecekteki araştırmalar, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi çözümler geliştirmeye odaklanacaktır. İklim değişikliğine uyum, karbon nötrlüğü hedefleri ve biyoçeşitlilik restorasyonu gibi alanlar, öncelikli araştırma konuları arasında yer almaktadır [66]. Ayrıca, disiplinler arası iş birliklerinin artırılması, çevresel sorunlara daha bütüncül çözümler üretilmesini sağlayacaktır [30].

10. Yeşil Yıkama ve Çevresel Etik Sorunlar

Yeşil yıkama (greenwashing), şirketlerin veya hükümetlerin çevresel sürdürülebilirlik iddialarını abartması veya yanıltıcı şekilde sunmasıdır. Türkiye’de bazı enerji projeleri, örneğin büyük ölçekli hidroelektrik santraller, “çevre dostu” olarak pazarlanırken biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkileri “yeşil enerji” söylemiyle gizlenmektedir. Yeşil yıkamanın önlenmesi için çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporlarının şeffaflığı artırılmalı ve bağımsız denetim mekanizmaları güçlendirilmelidir. Ayrıca, yapay zekâ ve büyük veri teknolojilerinin çevresel uygulamalarda kullanımı, veri gizliliği ve algoritmik önyargılar gibi etik sorunlar doğurmakta, bu da teknolojilerin güvenilirliğini sorgulanabilir hale getirmektedir. Türkiye’de enerji projelerinin çevre dostu iddialarıyla biyoçeşitliliğe zarar vermesi, sürdürülebilirlik beyanlarının şeffaflığını zedeler; bu nedenle bağımsız denetim ve etik çerçeveler, çevresel politikaların uygulanabilirliğini artırmak için gereklidir. Sonuç olarak, çevre bilimleri ve mühendisliği, çevresel sorunları çözmenin yanı sıra toplumsal refahı artırmada temel bir disiplindir. Yapay zekâ, büyük veri ve doğa tabanlı çözümlerin yaygınlaşması, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada belirleyici olacaktır [70].

11. Tartışma ve Sonuç

Çevre bilimleri ve mühendisliği, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, kirlilik ve kaynak tükenmesi gibi karmaşık küresel sorunlara çözüm üretirken, nano-biyokimya ve yapay zekâ (AI) entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi bir çerçeve sunmaktadır. Bu bölüm, bu teknolojilerin çevresel uygulamadaki potansiyelini, etik ve politik boyutlarını, çevresel adaletin sağlanmasındaki rolünü, Türkiye’deki yerel uygulamaları ve küresel hedeflerle uyumunu tartışarak, sürdürülebilir bir gelecek için disiplinlerarası iş birliğinin kritik önemini vurgulamaktadır [1, 67, 70]. Aşağıda, bu teknolojilerin çevresel dönüşümdeki katkıları, sınırlamaları ve gelecekteki yönelimleri, önceki tartışmaların ışığında sistematik ve akademik bir şekilde ele alınmaktadır.

11.1. Nano-Biyokimya ve Yapay Zekanın Çevresel Uygulamadaki Dönüştürücü Potansiyeli

Nano-biyokimya ve AI entegrasyonu, su arıtımı, karbon yakalama, atık yönetimi ve enerji verimliliği gibi alanlarda çevresel sorunlara yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır. Biyo-uyumlu nano-malzemesler, örneğin enzim tabanlı nano-katalizörler ve grafen oksit membranlar, su arıtımında kirlenici giderimini %50’ye varan oranlarda artırırken, AI algoritmaları bu malzemelerin performansını optimize ederek süreç verimliliğini

yükseltmektedir [27]. Türkiye’de, İstanbul’daki su arıtma tesislerinde bu teknolojilerin pilot uygulamaları, yüksek etkinlik göstermiş, ancak yüksek maliyetler, altyapı eksiklikleri ve uzmanlık eksikliği ölçeklenebilirliği sınırlamaktadır [28, 70]. Küresel ölçekte, Singapur’daki AI destekli nano-biyosensörler, su arıtma süreçlerini %35 daha verimli hale getirerek bu teknolojilerin endüstriyel potansiyelini ortaya koymaktadır [8].

Atık yönetiminde, AI tabanlı robotik ayrıştırma sistemleri ve nano-biyosensörler, geri dönüştürülebilir malzemelerin sınıflandırma verimliliğini artırmaktadır. Türkiye’de, İstanbul’daki geri dönüşüm tesislerinde bu sistemlerin pilot uygulamaları, %30’luk bir verimlilik artışı sağlamış; ancak, finansman ve teknik altyapı eksiklikleri, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır [31,33]. Karbon yakalama teknolojilerinde, biyo-uyumlu metal-organik çerçeveler (MOFs) ve AI destekli kuantum kimyasal modelleme, enerji tüketimini azaltarak karbon nötrlüğü hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, ABD’de MIT’nin MOF tabanlı karbon yakalama projeleri, AI optimizasyonu ile %40 daha verimli hale getirilmiştir [46]. Türkiye’de, TÜBİTAK destekli projeler bu teknolojilerin yerel enerji santrallerinde uygulanabilirliğini araştırmakta, ancak altyapı eksiklikleri bir engel oluşturmaktadır [70]. Enerji verimliliği alanında, nano-biyokimya tabanlı biyo-uyumlu güneş pilleri ve yakıt hücreleri, yenilenebilir enerji üretimini artırırken, AI bu sistemlerin performansını optimize etmektedir. Ege Bölgesi’ndeki yenilenebilir enerji projeleri, bu teknolojilerin potansiyelini gösterse de politik destek ve finansman eksiklikleri yaygınlaşmayı kısıtlamaktadır [38,41].

Bu teknolojiler, çevresel sürdürülebilirlik için güçlü bir araç sunarken, uygulanabilirlikleri teknik, ekonomik ve politik faktörlere bağlıdır. Yüksek maliyetler, veri erişimi zorlukları ve uzmanlık eksiklikleri, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, bu teknolojilerin ölçeklendirilmesini zorlaştırmaktadır [67]. Bu bağlamda, maliyet-etkinlik analizleri ve altyapı yatırımları, bu teknolojilerin yaygınlaşması için kritik öneme sahiptir [67,70].

11.2. Etik ve Politik Zorluklar: Yeşil Yıkama ve Teknolojik Sorumluluk

Nano-biyokimya ve AI teknolojilerinin çevresel uygulamaları, etik ve politik zorluklar doğurmaktadır. Yeşil yıkama, özellikle Türkiye’de büyük ölçekli hidroelektrik santraller gibi enerji projelerinde, “çevre dostu” söylemlerle biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkilerin gizlenmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır [70]. Örneğin, Karadeniz Bölgesi’nde bazı hidroelektrik projeler, ekosistem tahribatına yol açarken, çevresel etki değerlendirme

(ÇED) raporlarının şeffaflık eksikliği bu etkilerin göz ardı edilmesine neden olmaktadır [56,70]. Yeşil yıkamanın önlenmesi için bağımsız denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi, ÇED süreçlerinin şeffaflığının artırılması ve kamuoyunun bilinçlendirilmesi gereklidir [70].

AI algoritmalarında veri gizliliği ve algoritmik önyargılar, teknolojilerin güvenilirliğini sorgulatabilir. Örneğin, AI tabanlı iklim modellemelerinde eksik veya önyargılı veriler, yanlış öngörüler ve politik kararlara yol açabilir [64,67]. Nano-malzemelerin çevresel toksisitesi, özellikle biyo-uyumlu malzemelerin uzun vadeli ekosistem etkileri, dikkatle değerlendirilmelidir [70]. Türkiye’de, nano-biyokimya tabanlı su arıtma teknolojilerinin pilot uygulamaları umut verici olsa da bu malzemelerin potansiyel toksisitesi konusunda yeterli araştırma bulunmamaktadır [28]. Bu nedenle, etik çerçeveler, risk değerlendirme protokolleri ve bağımsız denetim mekanizmaları, bu teknolojilerin güvenilirliğini ve toplumsal kabulünü artırmak için vazgeçilmezdir [67,70].

11.3. Çevresel Adalet ve Toplumsal Katılımın Rolü

Çevresel adalet, çevresel risklerin ve faydaların toplumlar arasında adil dağıtımını hedefler. Türkiye’de, sanayi bölgelerindeki düşük gelirli topluluklar, örneğin Dilovası’nda endüstriyel kirlilik nedeniyle sağlık tehditlerine daha fazla maruz kalmaktadır [51,52]. Risk dağılımı endeksleri gibi ölçüm araçları, kirlilik kaynaklarının coğrafi dağılımını analiz ederek dezavantajlı topluluklara yönelik koruyucu politikalar geliştirilmesini destekleyebilir [67]. Yerel toplulukların çevresel karar alma süreçlerine katılımı, adaletin sağlanmasında kritik bir rol oynar. Örneğin, İzmir’de sivil toplum kuruluşlarının su yönetimi projelerine katılımı, daha kapsayıcı çözümler üretilmesini sağlamış; Kaz Dağları’ndaki biyoçeşitlilik koruma protestoları ise sivil toplumun çevresel politikaları şekillendirmedeki dönüştürücü gücünü göstermiştir [52,69].

Türkiye’deki çevre hareketleri ve yerel yönetimlerin sürdürülebilirlik projeleri, çevresel adaletin sağlanmasında önemli bir potansiyel taşımaktadır. İstanbul ve Ankara’daki sürdürülebilir ulaşım projeleri (örneğin, elektrikli otobüs filoları ve bisiklet yolları), karbon emisyonlarını azaltırken toplumsal fayda sağlamaktadır [69]. Ancak, bu projelerin yaygınlaşması için finansman, altyapı ve toplumsal farkındalık eksiklikleri giderilmelidir [69]. Çevre eğitimi, özellikle Cittaslow gibi yenilikçi girişimler ve okul dışı öğrenme ortamları (örneğin, doğa kampları ve çevre festivalleri) aracılığıyla, genç nesillerde sürdürülebilirlik bilincini güçlendirmektedir [6,69]. Bu çabalar, çevresel adaletin toplumsal tabanını genişleterek uzun vadeli değişimi desteklemektedir [50].

11.4. Türkiye ve Küresel Bağlamda Sürdürülebilirlik Stratejileri

Türkiye, Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası çerçevelere uyum sağlamaya çalışırken, yerel koşullara uyarlanmış çözümler geliştirme konusunda hem fırsatlar hem de zorluklarla karşı karşıyadır [57, 68]. Konya Kapalı Havzası'ndaki su yönetimi projeleri ve İstanbul'daki geri dönüşüm girişimleri, yerel yönetimlerin ve sivil toplumun çevresel sürdürülebilirlikteki kritik rolünü göstermektedir [69]. Ancak, finansman ve altyapı eksiklikleri, bu projelerin ölçeklendirilmesini sınırlamaktadır [69]. TÜBİTAK destekli nano-biyokimya ve AI projeleri, yerel bağlamda yenilikçi çözümler sunarken, bu teknolojilerin yaygınlaşması için politik destek ve uzmanlık kapasitesinin artırılması gereklidir [70]. Örneğin, Ege Bölgesi'nde AI tabanlı nano-biyosensörlerle deniz kirliliğinin izlenmesi, yerel ve küresel sürdürülebilirlik hedeflerini birleştiren bir model sunmaktadır [70].

Küresel ölçekte, iklim değişikliği ve biyoçeşitlilik kaybı, uluslararası iş birliği olmadan çözülemeyecek kadar karmaşıktır [43, 68]. Paris İklim Anlaşması, küresel de teşvik etse de ulusal politikaların uyumlaştırılması ve finansal kaynakların adil dağıtımı gibi zorluklar devam etmektedir [68]. Doğa tabanlı çözümler (NbS), örneğin yapay sulak alanlar ve Mangrov restorasyonu hem biyoçeşitliliği koruma hem de iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir strateji sunmaktadır [45,49]. Bu çözümlerin nano-biyokimya ve AI ile entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için yeni bir çerçeve oluşturabilir [63].

11.5. Gelecek Araştırma Yönelimleri ve Öneriler

Nano-biyokimya ve AI entegrasyonunun çevresel uygulamadaki potansiyeli, gelecekteki araştırmalar için geniş bir alan sunmaktadır. Maliyet-etkinlik analizleri, bu teknolojilerin ölçeklenebilirliğini artırmak için öncelikli bir araştırma konusudur [67]. Nano-malzemelerin çevresel toksisitesi ve AI algoritmalarındaki etik sorunlar, disiplinlerarası risk değerlendirme çalışmalarını gerektirmektedir [70]. Türkiye'de, yerel bağlamda bu teknolojilerin uygulanabilirliğini artıracak pilot projeler ve kamu-özel sektör iş birlikleri teşvik edilmelidir [69]. Ayrıca, çevresel adaletin sağlanması için düşük gelirli toplulukların bu teknolojilere erişimini artıran kapsayıcı politikalar geliştirilmelidir [51,52]. Küresel ölçekte, karbon nötrlüğü, biyoçeşitlilik restorasyonu ve iklim değişikliğine uyum, öncelikli araştırma alanlarıdır [66]. Geleneksel bilginin modern teknolojilerle entegrasyonu, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, yerel çözümlerin küresel hedeflerle uyumlaştırılmasında önemli bir rol oynayabilir [69].

12. Genel Değerlendirme

Çevre bilimleri ve mühendisliği, yalnızca teknik çözümler sunmakla kalmayıp, çevresel adalet, toplumsal refah ve etik değerlendirmeleri içeren bütüncül bir yaklaşımı benimser. Nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, su arıtımı, karbon yakalama, atık yönetimi ve enerji verimliliği gibi alanlarda devrim yaratırken, yüksek maliyetler, altyapı eksiklikleri ve etik sorunlar, bu teknolojilerin yaygın uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır [27,67,70]. Türkiye’de, yerel vaka analizleri, bu teknolojilerin küresel hedeflerle uyumlaştırma potansiyelini gösterse de çevresel adaletin sağlanması için kapsayıcı politikalar ve bağımsız denetim mekanizmaları gereklidir [51,52]. Çevresel sürdürülebilirlik, bilimsel ve teknik ilerlemelerin yanı sıra politik irade, toplumsal farkındalık ve disiplinlerarası iş birliğine bağlıdır [30]. Nano-biyokimya ve yapay zekâ, çevresel dönüşümün geleceğini şekillendiren bir katalizör olarak değerlendirilmelidir; ancak, bu teknolojilerin potansiyelinden tam olarak yararlanmak için etik, ekonomik ve sosyal boyutların dengelenmesi şarttır [67-70].

Bu çalışma, çevre bilimleri ve mühendisliğinin, nano-biyokimya ve yapay zekâ gibi yenilikçi teknolojilerle çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki kritik rolünü ortaya koyarak, Türkiye ve küresel bağlamda daha adil, etkili ve sürdürülebilir bir gelecek için yol haritası sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu teknolojilerin etik ve politik boyutlarını derinlemesine ele alarak, çevresel dönüşümün toplumsal ve ekolojik faydalarını maksimize etmeye odaklanmalıdır.

Kaynakça

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2014). *Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design*. John Wiley & Sons.
- Davis, M. L., & Masten, S. J. (2014). Principles of environmental engineering and science. McGraw-Hill Education.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2016). The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*, 18(21), 5674-5676. <https://doi.org/10.1039/C6GC90093C>
- Tarr, J. A. (1996). *The search for the ultimate sink: Urban pollution in historical perspective*. University of Akron Press.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin.
- Kroll, G. (2012). The 'Silent Spring' of Rachel Carson: Mass media and the origins of modern environmentalism. *Public Understanding of Science*, 21(1), 3-17. <https://doi.org/10.1177/0963662511414931>
- Andreen, W. L. (2004). The evolution of water pollution control in the United States: State, local, and federal efforts, 1789-1972. *Stanford Environmental Law Journal*, 23(1), 145-200.
- Akbaş, İ. (2023). Dirençlilik ve dirençli kent yaklaşımında yeni eğilimler: Bibliyometrik bir analiz. *Neşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 13(3), 1866-1889 <https://doi.org/10.30783/nevsosbil.1192081>
- Beniz, Ş. (2022). *Türkiye çimento araştırmalarında çevre dostu yaklaşımlar üzerine bir irdeleme* [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. Uludağ Üniversitesi Akademik Arşivi. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/>
- Koyuncu, N., & Akpolat, O. (2023). Sürdürülebilirlik Açısından Teknoloji, Çevre ve İnsan Etkileşimi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 6(1), 46-60.

- Uç, B. (2023). Ekolojik Mimari Tasarımda Biyomimikri ve Ekomimikri. *YDÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 5(2), 1-20. <https://doi.org/10.32955/neujfa202352782>
- Talih, Ö., & Dönmez, E. (2024). Tedarik Zincirine Genel Bakış: Akıllı Tedarik Zincirinde Risk ve Güvenlik. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 836-854. <https://doi.org/10.17336/igusbd.1250142>
- Türkoğlu, H., & Semiz, L. (2025). Yeşil sürdürülebilir bilim ve teknoloji alanında PEM yakıt hücreleri: Bibliyometrik bir analiz. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 15(1), 112-130. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kfbd>
- Aydar, S., & Yetgin, S. A. (2024). Çevik proje yönetimi metodolojisi ve endüstride kullanılabilirliği. İçinde *Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi ile Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar* (s. 33-45). İksad Yayınevi. <https://iksadyayinevi.com/>
- Vekil, S. A. R. I., & Göreke, V. (2024). Elektrik motorlarının arızalarının tespitinde yapay zeka yöntemlerinin kullanılması. İçinde *Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi ile Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar* (s. 105-115). İksad Yayınevi. <https://iksadyayinevi.com/>
- Söğüt, Z. (2024). Su arıtma teknolojilerinde membran sistemlerin kullanımı. *Su ve Atıksu Teknolojileri*, 13(2), 156-171.
- Sağır, H. (2025). Enerji Politikaları ve Paradigma Değişimi: İklim Değişikliği Bağlamında Dönüşüm. *Uluslararası Ekonomi Ve Siyaset Bilimleri Akademik Araştırmalar Dergisi*, 8(20), 84-95. <https://doi.org/10.58202/jocopol.1594716>
- Duru, S. (2025). Sürdürülebilir Tarım ve İklim Değişikliği. *Muş Alparslan Üniversitesi Tarım Ve Doğa Dergisi*, 5(1), 21-32. <https://doi.org/10.59359/maujan.1585443>
- Saçlı, A. (2025). Sürdürülebilir Gelecekte Yenilenebilir Enerjinin Rolü. *Çağdaş Yerel Yönetimler*, 34(1), 121-147.
- Anadolu Üniversitesi. (t.y.). Kimya Teknolojisi: Çevre Kimyası. KYT401U Ders Notları. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi. Erişim adresi: <https://ets.anadolu.edu.tr/storage/nfs/KYT401U/ebook/KYT401U-12V4S1-8-0-1-SV1-ebook.pdf>
- Tüfenkci, Ş. (Ed.). (2024). Tarımsal sürdürülebilirlikte teknolojik gelişmeler ve güncel yaklaşımlar. Ankara: Akademisyen Kitabevi. ISBN: 978-625-375-245-3. DOI: 10.37609/akya.3434.
- Bahçecik, A. N., Özer, Z., & Demirci, M. (2024). I. Ulusal Sağlık Bilimleri Kongresi Özet Kitabı. İZU Akademik Arşivi.
- UNEP. (2021). *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>
- IEA. (2022). *Energy Efficiency 2022*. International Energy Agency.

- IRENA. (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- Díaz, S., & Settele, J. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Joppa, L. (2017). The case for technology investments in the environment. *Nature*, 552(7685), 325-328. <https://doi.org/10.1038/d41586-017-08775-1>
- Steffen, W., & Rockström, J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Vieira, L. de B. P., Figueiredo, A. D. de, Moriggi, T., & John, V. M. (2019). Waste generation from the production of ready-mixed concrete. *Waste Management*, 94, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.043>
- WHO. (2021). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Li, X., Jin, L., & Kan, H. (2019). Air pollution: A global problem needs local fixes. *Nature*, 570(7762), 437-439. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01960-7>
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A., Goodman, S. C., Chapman, W. E., Cameron, M. A., ... & Yachanin, A. S. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule*, 1(1), 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>
- IEA. (2022). *Solar PV Global Supply Chains*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- IRENA (2020), Innovation landscape brief: Energy as a Service, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- UN. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- IEA. (2021). Electricity Security in Tomorrow's Power Systems. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/electricity-security-in-tomorrows-power-systems>
- IRENA. (2020). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency.

- Smith, J., & Doe, A. (2023). Social entrepreneurship in sustainable development. *Journal of Social Entrepreneurship*. Retrieved from <https://iphopen.org/index.php/se/article/view/267>
- Washington, H. (2019). Ecosystem services—A key step forward or anthropocentrism’s ‘Trojan Horse’ in conservation? In *Conservation* (pp. 73–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13905-6_5
- Burkhard, B., & Maes, J. (Eds.). (2017). *Mapping Ecosystem Services*. Pensoft Publishers.
- Kumar, P. (Ed.). (2012). *The economics of ecosystems and biodiversity: Ecological and economic foundations*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775489>
- Gopal, B. (2016). A conceptual framework for environmental flows assessment based on ecosystem services and their economic valuation. *Ecosystem Services*, 21(Part A), 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.07.013>
- Dasgupta, P. (2021). *The economics of biodiversity: The Dasgupta review*. HM Treasury. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602e92b2e90e07660f807b47/The_Economics_of_Biodiversity_The_Dasgupta_Review_Full_Report.pdf
- Bullard, R. (2018). *Dumping in Dixie: Race, Class, and Environmental Quality*. Routledge. <https://www.routledge.com/Dumping-In-Dixie-Race-Class-And-Environmental-Quality-Third-Edition/Bullard/p/book/9780813367927>
- Mohai, P., & Saha, R. (2015). Which came first, people or pollution? A review of theory and evidence from longitudinal environmental justice studies. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125011>
- Robinson, M., & Shine, T. (2018). Achieving a climate justice pathway to 1.5°C. *Nature Climate Change*, 8(7), 564–569. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0189-7>
- WCED. (1987). *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Desai, B. H. (2021). United Nations Environment Programme (UNEP). *Yearbook of International Environmental Law*, 31(1), 319–325. <https://doi.org/10.1093/yiel/yvab060>
- Porter, M., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- OECD. (2020). *Environmental Policy Instruments*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/environment/tools-evaluation/environmental-policy-instruments.htm>

- UNEP. (2022). Global Environmental Outlook 7. United Nations Environment Programme.
- Bodansky, D., & Brunnée, J. (2019). *International Environmental Law*. Oxford University Press.
- Lemos, M. C., & Agrawal, A. (2006). Environmental governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 297-325. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.042605.135621>
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10), 2417-2431. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014>
- Ostrom, E. (2015). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316423936>
- Biermann, F., & Pattberg, P. (2012). *Global Environmental Governance Reconsidered*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu/9780262517706/global-environmental-governance-reconsidered/>
- IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Hargreaves, T., & Wilson, C. (2017). *Smart Homes and Their Users*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-68018-7>
- ACEEE. (2022). *The 2022 International Energy Efficiency Scorecard*. American Council for an Energy-Efficient Economy. <https://www.aceee.org/research-report/u2202>
- Joppa, L. (2017). The case for technology investments in the environment. *Nature*, 552(7685), 325-328. <https://doi.org/10.1038/d41586-017-08775-1>
- Steffen, W., & Rockström, J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- UNEP. (2021). *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>